

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV FYZIKÁLNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF PHYSICAL ENGINEERING

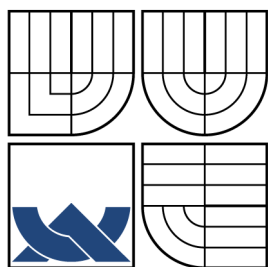
ŘÍZENÍ DEPOZIČNÍHO PROCESU POMOCÍ POČÍTAČE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

MICHAL PAVERA

BRNO 2009



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV FYZIKÁLNÍHO INŽENÝRSTVÍ



FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF PHYSICAL ENGINEERING

## ŘÍZENÍ DEPOZIČNÍHO PROCESU POMOCÍ POČÍTAČE COMPUTER CONTROL OF THE DEPOSITION PROCESS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

MICHAL PAVERA

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

ING. MICHAL URBÁNEK, PH.D.

BRNO 2009

sem vložit zadání

## **ABSTRAKT**

Bakalářská práce se zabývá problematikou spojenou s návrhem automatizace depozice ultratenkých vrstev metodou IBAD. Jedním z úkolů bakalářské práce je návrh a realizace ovládání držáku substrátu a terče. Tato práce tedy obsahuje výkresovou dokumentaci úpravy manipulátorů držáku terče a ovládání clony, pro možnost jejich ovládání pomocí krokových motorů. Dalším úkolem je návrh elektrického a programového řízení primárního a sekundárního iontového zdroje. Je zde tedy popsáno řešení propojení celé aparatury s počítačem pomocí AD/DA převodníků a jejich vhodné naprogramování. V závěru jsou diskutovány rozdíly mezi manuálním a automatizovaným ovládáním a také jejich klady a zápory.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

IBAD, IBS, iontové naprašování, iontový zdroj, krokový motor, AD/DA převodník, vrstva, depozice tenkých vrstev

## **ABSTRACT**

This bachelors thesis deals with automation of the deposition process of the ultrathin layers by IBAD method. One of the tasks is to design motorized target and shutter manipulator. The thesis therefore contain drawings of these manipulators. Which enable their control by stepper motors. Second task is to design of electronics and program control of primary and secondary ion source. In this part is described connection of the system with the computer using AD/DA converters and the appropriate programming. Last part of the thesis deals with differences between automated and manual control of the system, their advantages and disadvantages.

## **KEYWORDS**

IBAD, IBS, ion source, step motor, AD/DA converter, layer, thin-film deposition

PAVERA, M. Řízení depozičního procesu pomocí počítače. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 46 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Michal Urbánek, Ph.D.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Řízení depozičního procesu pomocí počítače“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)

## Poděkování

Rád bych poděkoval všem kteří se, přímo či nepřímo, podíleli na vzniku této práce. V první řadě bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Michalu Urbánkovi za cenné rady a vstřícnost při řešení problémů. Také chci poděkovat Ing. Petru Báborovi za připomínky, jež mě nasměrovaly správným směrem. Můj velký dík patří svým rodičům, za podporu při studiu a také všem kteří mi zpříjemňovali chvíle v laboratoři 518. Nakonec mé velké díky patří i Bc. Oskáru Hanzélymu za neocenitelnou pomoc při řešení technických problémů.

# OBSAH

<b>1 Úvod</b>	<b>8</b>
<b>2 Teoretická část</b>	<b>9</b>
2.1 Leptání a depozice tenkých vrstev pomocí IBS/IBAD . . . . .	9
2.2 Princip iontového odprašování a interakce iontů s povrchy . . . . .	9
2.3 Kolizní kaskáda . . . . .	11
2.3.1 Režim jednoduchých nárazů . . . . .	12
2.3.2 Lineární kaskádový režim . . . . .	12
2.3.3 Režim tepelného bodce . . . . .	13
2.4 Aplikace metody . . . . .	13
<b>3 Praktická část</b>	<b>15</b>
3.1 Popis zařízení „Kaufman“ . . . . .	15
3.1.1 Iontové zdroje . . . . .	16
3.1.2 Držák substrátu, terče a clony . . . . .	16
3.1.3 Vakuové vývěvy a měrky tlaku . . . . .	17
<b>4 Návrh manipulátorů</b>	<b>18</b>
4.1 Elektrické ovládání manipulátorů . . . . .	18
4.1.1 Krokové motory . . . . .	18
4.2 Mechanické ovládání manipulátorů . . . . .	20
4.3 Programování krokových motorů . . . . .	21
<b>5 Iontové zdroje</b>	<b>23</b>
5.1 Návrh ovládání primárního a sekundárního iontového zdroje . . . . .	23
5.1.1 Postup zapálení výboje a extrakce iontů . . . . .	24
5.1.2 Navržení elektrického obvodu pro ovládání a komunikaci s PC . . . . .	26
5.2 Programování v LabVIEW . . . . .	30
5.2.1 Program Kaufman 1.0 . . . . .	32
5.2.2 Blokové schéma programu Kaufman 1.0 . . . . .	35
<b>6 Zhodnocení výsledků</b>	<b>42</b>
<b>7 Závěr</b>	<b>45</b>
<b>Literatura</b>	<b>46</b>



# 1 ÚVOD

Studium tenkých vrstev a multivrstev patří v moderní fyzice k nejpopulárnějším vědním oborům. Tuto oblibu si lze vysvětlit širokou škálou využití, ať už čistě fyzikálního nebo v konečné fázi i komerčního významu. V první řadě jde o vědní obor, jež dal základ nanotechnologiím. V komerční sféře pak může jít o mnohá optická, komunikační či výpočetní zařízení. Kromě toho studium tenkých vrstev představuje úchvatnou ukázkou sladění a spolupráce mnoha rozdílných polí fyziky a má tedy mnoho směrů, kterými se lze zabývat. Díky široké škále aplikací lze tomuto oboru do budoucna předvídat jistě stále stoupající popularitu. Budoucí využití této technologie ovšem závisí na tloušťce a kvalitě těchto vrstev, proto se vkládá do tohoto odvětví nemalé množství finančních prostředků.

Cílem předkládané bakalářské práce je řízení depozičního procesu metodou IBAD (Ion Beam Assisted Deposition) pomocí počítače, jež úzce souvisí s kvalitou vytváření tenkých vrstev a multivrstev. Tvorba ultratenkých vrstev s přesností desetin nanometrů závisí na přesném nastavení parametrů iontových zdrojů metody IBAD a také přesného ovládání clony spolu s držákem terčů. Vedle samotného řešení obsahuje rovněž teoretické a praktické poznatky spojené s problematikou tvorby tenkých vrstev.

Práce je rozdělena do několika částí. První část se zabývá teoretickými poznatky depozice tenkých vrstev a multivrstev metodou IBAD, principem činnosti širokosvazkového zdroje, vlivem počátečních parametrů a také aplikacemi této metody.

V druhé části se popisuje praktické řešení metody IBAD. Obsahuje popis aparatury “KAUFMAN” spolu s popisem ovládání primárního a sekundárního iontového zdroje.

Třetí část se zaměřuje na problematiku elektrického a mechanického ovládání clony substrátu a držáku terčů. Je zde nastíněné řešení pomocí krokových motorů a také mechanický návrh jejich upevnění k aparatuře. V závěru této kapitoly je nastíněný způsob jejich vhodného naprogramování.

V další části je popsána realizace ovládání primárního a sekundárního iontového zdroje. Je popsán konstrukční návrh ovládání spolu s popisem galvanických oddělovačů. Ty jsou nezbytné pro oddělení jednotlivých stabilizovaných napěťové proudových zdrojů od AD/DA převodníku. V této kapitole je řešeno i ovládání napěťových zdrojů k extrakčním mřížkám iontového zdroje.

Poslední část se zaměřuje na vyhodnocení testovacích pokusů, společně s komentářem výhod tohoto zapojení.

## 2 TEORETICKÁ ČÁST

### 2.1 Leptání a depozice tenkých vrstev pomocí IB-S/IBAD

Proces naprašování se skládá z několika kroků: prvním krokem je zapálení výboje v iontovém zdroji a následná extrakce iontů přes extrakční mřížku. Tyto ionty dopadají na terč, ze kterého postupně odprašují materiál a ten je deponován na substrát.

Při naprašování metodou IBAD lze použít i sekundárního iontového zdroje. Ten emituje ionty, které přímo bombardují vrstvu která současně vzniká naprašováním z terče a modifikují tak její fyzikální vlastnosti.

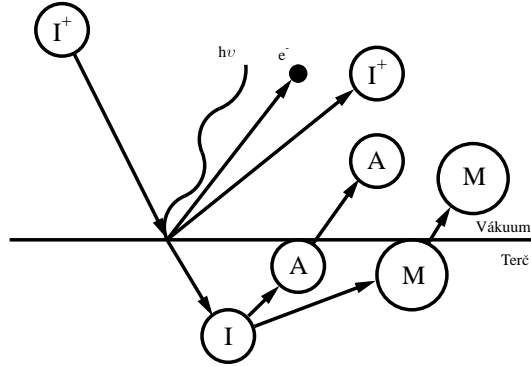
Při depozici pomocí iontového svazku lze oproti jiným metodám přesně nastavit různé parametry daného procesu. Můžeme ovlivnit hustotu toku iontů, úhel dopadu iontů a jejich energii. V porovnání s jinými metodami je tato metoda také mnohem přesnější. Provozuje se při nižších tlacích, čímž dochází k menší kontaminaci znečištění naprašované vrstvy jinými částicemi, například zbytkovým plynem.

### 2.2 Princip iontového odprašování a interakce iontů s povrchy

Po dopadu iontů na terč obsahující vzorek rozprašovaného materiálu dochází k celé řadě fyzikálních procesů (Obr. 2.1) [3]. Tyto procesy jsou závislé převážně na energii dopadajících iontů. Na tomto poznatku jsou založeny různé fyzikální metody zkoumání povrchu materiálu. Při bombardování povrchů může tedy docházet například k:

- odrazu iontů od povrchu - tzv. zpětný rozptyl,
- proniknutí do terče a vyvolání srážkových kaskád, což vede k odprašování,
- odprašování víceatomových částic,
- emisi sekundárních elektronů,
- emisi fotonů.

Pro naše účely se zaměříme pouze na dopad iontu s energií schopnou vyvolat kolizní kaskády, protože ty vedou k vyražení atomů z terče. Tento proces vyražení atomů z terče za pomoci dopadajících iontů se nazývá odprašování.



Obrázek 2.1: Dopad primárního iontu na terč ( $I^+$  - primární nebo zpětně odražený iont,  $h\nu$  - emise fotonů,  $e^-$  - emise sekundárních elektronů,  $A$  - odprašování atomů,  $M$  - odprašování molekul)

Odprašování je komplikovaný a těžko popsatelný jev a kolizní kaskáda je pouze zjednodušený pohled na tuto problematiku. Jde o energeticky velice neúčinný proces kde energie  $E_{vys}$  vystupujících částic z látky je pouze nepatrnou částí energie iontů, které látku bombardují.

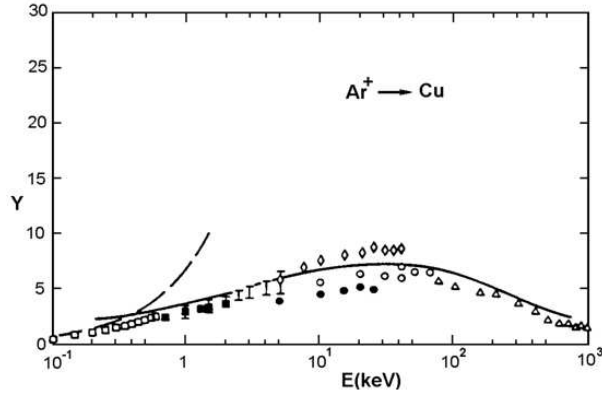
Nejdůležitějším parametrem účinnosti odprašování je tzv. odprašovací výtěžek. Ten je definován jako průměrný počet emitovaných atomů připadajících na jeden primární iont. Tento parametr je závislý na typu, úhlu dopadu, energii primárních iontů a na struktuře látky terče. Pro nízké energie (řádově několika desítek eV) lze odprašovací výtěžek vypočítat jako

$$Y \approx \alpha \frac{1}{U_0}, \quad (2.1)$$

kde  $\alpha$  je funkcí podílu atomové hmotnosti atomu terče a dopadajícího iontu a  $U_0$  je povrchová vazebná energie.

Na obrázku 2.2 vidíme křivku závislosti odprašovacího výtěžku na energii primárních iontů, kde plná čára znázorňuje teoretickou hodnotu a jednotlivé značky jsou experimentálně naměřené hodnotou různých vědeckých skupin.

Odprašovací výtěžek silně závisí na úhlu dopadu primárních iontů. U amorfního terčíku roste při zvětšujícím se úhlu od normály plochy a při zhruba  $55^\circ - 65^\circ$  je maximální. Dalším zvětšováním odprašovací výtěžek klesá a při velkých úhlech již dochází k totálnímu odrazu. U monokrystalického terčíku není závislost ekvivalentní, vykazuje maxima a minima, která jsou závislá na orientaci krystalové mřížky.



Obrázek 2.2: Odprašovací výtěžek jako funkce energie primárních iontů [4].

## 2.3 Kolizní kaskáda

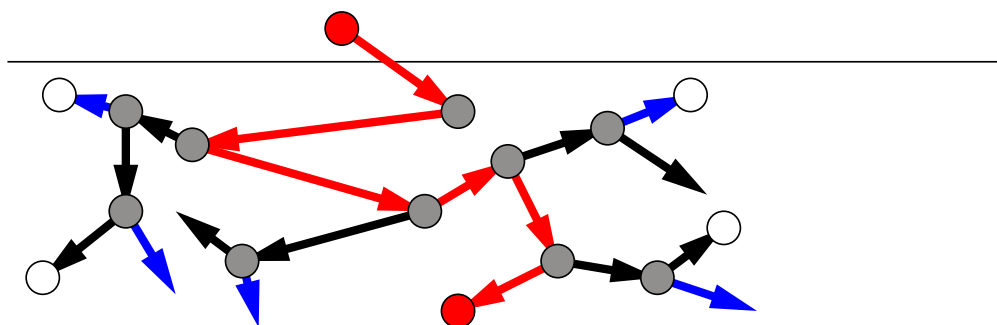
Kolizní kaskáda (Obr.2.3) je základním modelem popisujícím zjednodušené odprašování. Při dopadu iontů o dostatečné energii na povrch terče nedochází pouze k předání energie, ale také k vyražení primárních atomů. Je-li energie dopadajících iontů výrazně větší než je vazebná energie atomů ve vzorku, předá se část energie iontu atomu, čímž dojde k vyražení atomu ze své vazby a částečné přeměně kinetické energie v tepelnou. Dále se tento atom pohybuje vzorkem podobně jako původní iont, přičemž postupně dochází k dalším kolizím s předáváním části energie, čímž se generuje celá kaskáda uvolněných atomů. Každý individuální atom se poté ustálí v místě, kde již nemá dostatečnou energii pro uvolnění další vazby. Přesněji řečeno k ustálení dojde ve chvíli, kdy se veškerá kinetická energie přemění v tepelnou. Během celého tohoto procesu může dojít k vyražení atomu, který je umístěn těsně pod povrchem vzorku, do volného prostoru. Typickým příkladem je dopad iontu argonu s energií několika eV. Při tomto dopadu dojde k posunu terče zhruba o 1 nm ve zvláštních případech mohou být posuny větší. Tyto posuny nejsou jenom ve směru dopadu iontu, ale izotropně do všech ostatních směrů což je zřetelné ze samotné podstaty kolizní kaskády.

Pro analytické účely je někdy vhodné znát hloubku průniku primárních iontů do látky

$$R = \xi E_0^\delta \cos(\alpha), \quad (2.2)$$

kde  $R$  je hloubka průniku primárních iontů,  $E_0$  energie iontů,  $\alpha$  úhel dopadu a  $\xi$ ,  $\delta$  jsou konstanty (např.  $Ar^+$ :  $\xi = 1,622$ ,  $\delta = 0,84$ ,  $Cs^+$ :  $\xi = 1,838$ ,  $\delta = 0,68$ ).

Hustota kaskád závisí především na počátečních podmínkách a vlastnostech dopadajícího iontu. Především se jedná o jeho hmotnost a energii. Při kolizi iontů o různých počátečních podmínkách může dojít ke třem různým stavům:

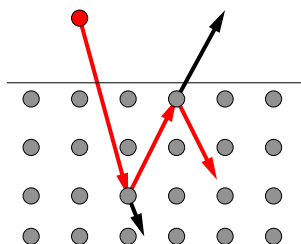


Obrázek 2.3: Dopad iontu na vzorek a vytvoření srážkové kaskády.

- režimu jednoduchých nárazů,
- lineárnímu kaskádovému režimu,
- režimu tepelného bodce.

### 2.3.1 Režim jednoduchých nárazů

K tomuto stavu (Obr.2.4) dochází při dopadu iontů o nízkých hmotnostech a energiích. Počáteční energie se pohybují řádově v rozmezí 10 eV - 100 eV. Při dopadu iontu na terč se veškerá jeho energie předá atomům blízko povrchu vzorku, přičemž uvnitř vzorku dojde k malému počtu srážek atomů. Kaskáda se nevytvoří a s velkou pravděpodobností dojde k vyražení atomu ze vzorku.

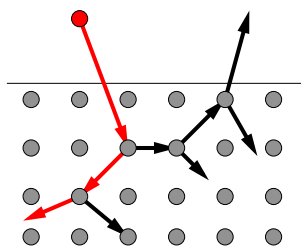


Obrázek 2.4: Režim jednoduchých nárazů.

### 2.3.2 Lineární kaskádový režim

Lineární kaskádový režim (Obr.2.5) vzniká dopadem iontů o velkých energiích. Energie těchto iontů se pohybuje v rozmezí 1 keV - 1 MeV. Lineární kaskádový režim lze označit jako standardní režim tvorby kaskády ve vzorku. Iont po dopadu na vzorek

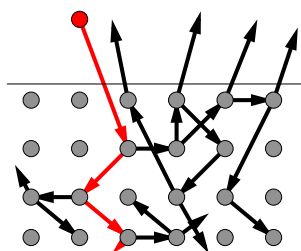
předá část své energie atomu. Tento atom je vyražen, dále postupuje vzorkem a uvolňuje z vazeb další atomy.



Obrázek 2.5: Lineární kaskádový režim.

### 2.3.3 Režim tepelného bodce

K tomuto režimu (Obr.2.6) dochází při dopadu těžkých iontů o velkých energiích. Energie iontů se pohybuje v rozmezí 100 keV - 1 MeV. Je patrné, že tento režim částečně energiově překrývá lineární kaskádový režim, rozdíl hledíme hlavně v počátečních hmotnostech iontů. Podstatnou roli zde hrají srážky mezi částicemi o vysokých rychlostech kdy dochází k tvorbě velice husté kolizní kaskády. V limitním případě se všechny atomy stávají tepelným souborem o vysoké teplotě a můžeme tak hovořit o lokálním tavení, ba dokonce vypařování pevné látky. Celý proces proběhne během velice krátkého časového úseku.



Obrázek 2.6: Režim tepelného bodce.

## 2.4 Aplikace metody

Prvotním účelem metody výroby tenkých vrstev pomocí IBAD je rozvoj a studium nanotechnologií. Z přímých aplikací potom jmenujme například:

- leptání struktur,

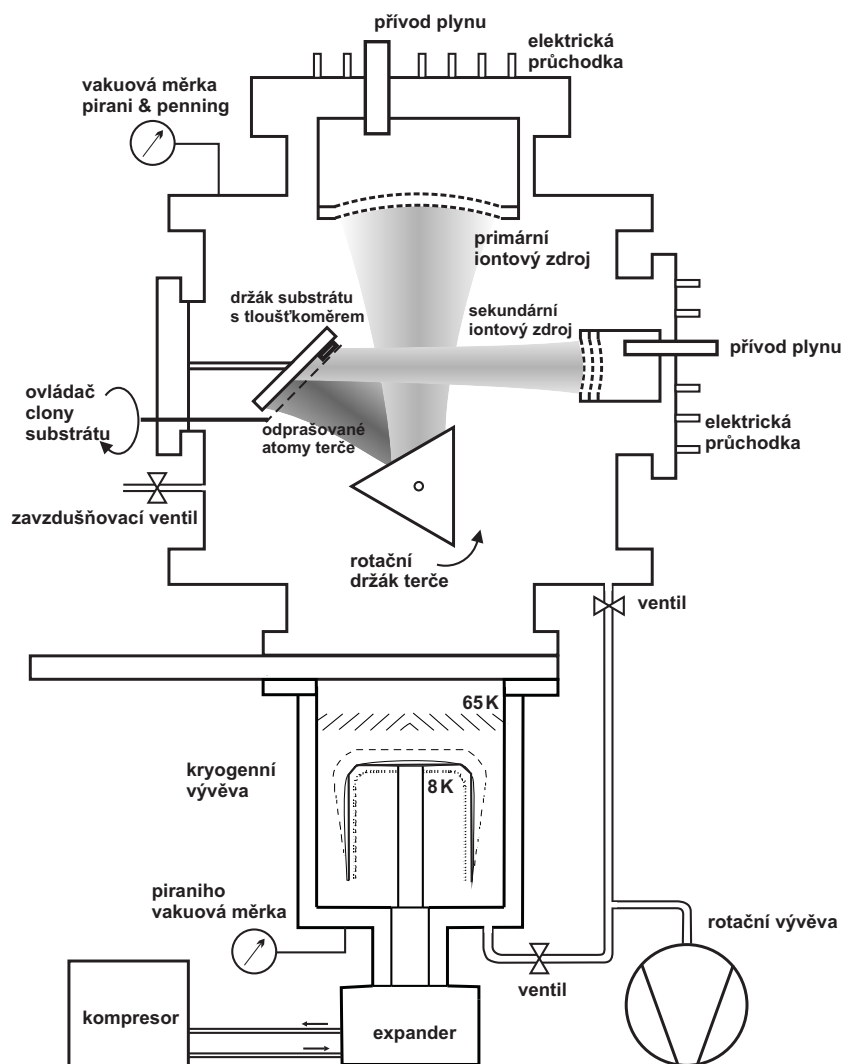
- optické tenké vrstvy,
- magnetické vrstvy,
- ochranné tenké vrstvy,
- polovodičový průmysl.

## 3 PRAKTICKÁ ČÁST

### 3.1 Popis zařízení „Kaufman“

Na Ústavu fyzikálního inženýrství se v čistých laboratořích vyskytuje reálná aparatura IBAD nazývaná „Kaufman“ (Obr.3.1). Základ tvoří dva iontové zdroje Kaufmanova typu [1], z čehož vychází také celkové označení aparatury. Vyskytuje se zde také spousta dalších zařízení, nutných ke správné funkci při procesech jako leptání, odprašování, či naprašování, za užití iontového svazku.

Vakuovou komoru, jež má 440 mm v průměru, 400 mm na výšku a která byla vyvinuta na ústavu fyzikálního inženýrství, okupují dva iontové zdroje Kaufmanova typu, držák substrátu, otočný držák terče, otočný držák clony substrátu a mnohé další.



Obrázek 3.1: Zařízení „Kaufman“.



### 3.1.1 Iontové zdroje

Jako zajímavost iontových zdrojů Kaufmanova typu můžeme uvést jejich prvotní účel. Byly totiž vyvinuty jako pohon kosmických lodí, jehož princip byl založen na emisi širokého svazku iontů, který dosahoval v průměru až několika cm.

Primární iontový zdroj ve výbojové komoře má v průměru 150 mm. Od vakuové komory ho dělí stínicí a extrakční mřížka. Stínicí mřížka má za úkol ohraničení plazmatu a extrakční extrakci iontů do komory. Mřížky jsou vytvořeny z molybdenu. Pomocí těchto mřížek, a v závislosti na nastavených napětích, můžeme dosáhnout fokusace iontů do svazku o poloměru cca 40 – 80 mm. Energie iontů, které opouští iontový zdroj se pohybuje v rozmezí 50 – 1200 eV, v závislosti na nastavených potenciálech na mřížkách. Primární iontový zdroj se používá k rozprašování terče.

Sekundární iontový zdroj má v průměru 75 mm a jeho nedílnou součástí tvoří stínicí, extrakční a decelerační mřížka. Účel stínicí a extrakční mřížky odpovídá účelu na primárním iontovém zdroji, decelerační navíc odstiňuje výbojovou komoru a zlepšuje fokusaci. I tyto mřížky byly vytvořeny z molybdenu. Tento iontový zdroj se používá k bombardování, současně deponovaných vrstev, k leptání a k čištění substrátu. Tímto je možné jednoduše ovlivnit chemické a fyzikální vlastností jako struktura, tvrdost, případně index lomu.

Jedním z hlavních úkolů této práce je navrhnout elektrické ovládání těchto zdrojů, které bude popsáno dále.

### 3.1.2 Držák substrátu, terče a clony

Podstata naprašování je založena na přenosu atomů terče na substrát. Terč s naprašovanou látkou je umístěn na držáku, který můžeme ovládat pomocí manipulátoru. Manipulátorem lze pohybovat terčem ve svislém směru. Tento pohyb ovlivňuje vzdálenost terče od substrátu a tedy i dopad atomů na substrát. Dalším možným pohybem je rotace terče kolem vlastní osy. Tím se může zaměnit terč s naprašovanou látkou, což ve výsledku vede k tvorbě ultratenkých multivrstev. Rovněž lze tímto způsobem měnit úhel dopadu iontů.

Při odprášení atomů z terče, dopadají tyto atomy na držák se substrátem, na kterém se postupně vytváří tenká vrstva. Nastavení držáku substrátu je pevné a nelze jej během celého procesu měnit. Polohu můžeme změnit teprve po ukončení experimentu a otevření vakuové aparatury. Držák substrátu je vyhříván pomocí wolframové spirály a je od vakuové komory elektricky izolován pomocí keramických podložek.

Před tento držák se umísťuje clona, kterou lze celý substrát podle potřeby libovolně překrýt a tím zamezit dopadu iontů a atomů odprášeného materiálu (jak z terče tak sekundárního iontového zdroje). Na držák substrátu je upevněn krystalový

měřič tloušťky. Clonu substrátu lze ovládat z vnějšku pomocí manipulátoru, který vypadá fyzicky naprosto stejně jako manipulátor otáčení terče.

Návrh manipulátorů otáčení terče a ovládání clony substrátu, je popsán v následující kapitole.

### 3.1.3 Vakuové vývěvy a měrky tlaku

Vakuovou komoru čerpají dvě vývěvy. Primární vakuum zajišťuje rotační olejová vývěva, která předčerpává aparaturu na tlak cca 2 Pa. Při tomto tlaku se aktivuje druhá, kryogenní vývěva. Použitím této pumpy jsme schopni dosáhnout v aparatuře tlaku cca  $2 \cdot 10^{-5}$  Pa. Čerpací rychlost kryogenní vývěvy je  $2000 \text{ l s}^{-1}$ .

Kvůli velkému rozsahu tlaků jsme nuceni měřit tlaku v aparatuře dvěmi měrkami. Piraniho měrka měří nižší vakuum, tedy pracovní rozsah tlaků 10 kPa až  $10^{-1}$  Pa. Pro vyšší vakuum využíváme Penningovu měrku jejíž rozsah je 0,1 Pa až  $10^{-5}$  Pa.

## 4 NÁVRH MANIPULÁTORŮ

### 4.1 Elektrické ovládání manipulátorů

Návrh elektrického ovládání clony substrátu, otočného terče a její realizace, je prvním úkolem této práce. Podstatou tohoto úkolu je náhrada současného manuálního manipulátoru vhodným zařízením, které lze ovládat pomocí počítače.

Úkol se vztahuje pouze na rotační ovládání manipulátoru terče a rotační ovládání clony substrátu. Další směry, jež byly popsány v předešlé kapitole, nejsou podstatou této práce.

Fyzické ovládání terče i clony je totožné, liší se pouze rozsah nastavení a důvod použití. Dále se tedy zabýváme pouze ovládáním terče a ovládání clony chápeme pouze jako analogii.

Rotační pohyb držáku substrátu uskutečňuje mechanický, otočný manipulátor. Jeho jádro tvoří soustava ložisek a samotný kroutící moment je přenášen pomocí plastové hlavice, jež je na okrajích pro snadnější uchopení zdrsněná.

#### 4.1.1 Krokové motory

Vhodnou náhradou současného manuálního ovládání se zdají být krokové motory.

Krokový motor se používá v mnoha oblastech přesné mechaniky, robotiky a nebo pro nás důležité oblasti regulační techniky. Toto zařízení se od obyčejných motorů liší hlavně tím, že kromě rychlosti otáček lze nastavit i mnohé další parametry. Nejdůležitějšími parametry které lze nastavit jsou poloha rotoru a směr otáčení. Ten můžeme programově měnit, aniž by muselo dojít k vnějšímu přepólování motoru.

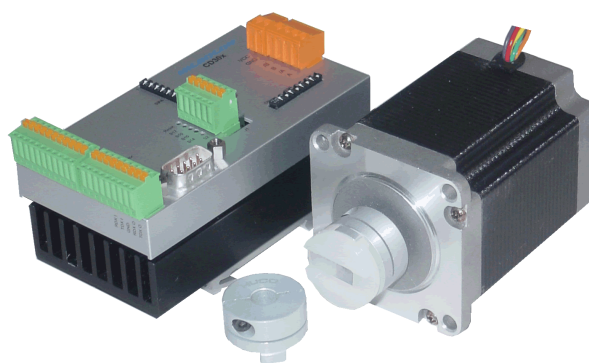
Výrobou krokových motorů se zabývají mnohé komerční firmy na celém světě. My jsme zvolili tuzemského výrobce MICROCON.

U tohoto výrobce byla zakoupena celá vývojová sada (Obr.4.1) pro ovládání krokových motorů. Tato sada obsahovala programovatelnou jednotku *CD30x*, krokový motor *S23 – 2727*, napájecí zdroj *PS35* a nezbytné ovládací programy a kabely.

#### Programovatelná jednotka *CD30x*

Tato deska tvoří základ ovládání krokových motorů firmy MICROCON. Na desku jsou vyvedeny konektory pro připojení zdroje napětí a také se na ní nachází výstupy pro zapojení a následné ovládání krokového motoru.

V základu deska obsahuje 10 galvanicky oddělených uživatelských výstupů, jež jsou vhodné pro monitorování stavu krokového motoru, a 4 galvanicky oddělené



Obrázek 4.1: Vývojová sada MICROCON.

uživatelské vstupy. Ty lze nakonfigurovat pro ovládání motoru bez nutnosti přímého zaslání ovládacího kódu.

Za nezbytnou součást desky lze považovat kontroler M1486E1 s vnitřní pamětí pro povely EEPROM 2000 bitů. EEPROM je elektricky mazatelná paměť, která je omezena počtem zápisů, v našem případě tedy 2000 bitů. Výhoda této paměti spočívá v tom, že povely jsou uschovány v kontroleru i po vypnutí napájení.

Samotné ovládání a nahrávání programovacích povelů na tuto desku zajišťuje jednoduché sériové rozhraní *RS232*. Programování se uskutečňuje jednoduchou sekvencí povelů v *ASCII* kodu, jež odesíláme na toto zařízení.

Přesnější technické údaje o programovatelné jednotce *CD30x* udává tabulka 4.1.

Napájecí napětí	12 – 24V
Amplituda proudu	0,4 – 3,3A
Doporučený počet mikrokroků na celokrok	4, 8, 16
Statické momenty	1, 2 – 8, 5 Nm
Rozměry	105 × 57 × 47 mm

Tabulka 4.1: Technické parametry programovatelné jednotky *CD30x*.

### Krokový motor *SX23 – 2727*

Hlavní výhodou tohoto motoru vidíme v jeho poměrně malých rozměrech, vysoké přesnosti a stabilitě.

Délka jednoho kroku je nastavena na  $1,8^\circ$  s možností mikrokrokování, kdy hodnotu kroku můžeme ještě  $16\times$  zmenšit. Přesnost tedy naprosto vyhovuje našim požadavkům.

Nelze přehlédnout ani možnost zapojení motoru jako bipolárního nebo unipolárního. Bližší technická specifikace viz. tabulka 4.2.

Odpor	1,4 $\Omega$ (sériově); 0,35 $\Omega$ (paralerně)
Jmenovitý proud	2,7 A (sériově); 5,4 A (paralerní)
Indukčnost	6,4 mH (sériově); 1,6 mH (paralerně)
Statické momenty	2,7 Nm
Moment setrvačnosti rotoru	0,053 kgm <sup>2</sup> $\times 10^{-3}$

Tabulka 4.2: Technické parametry krokového motoru *SX23 – 2727*.

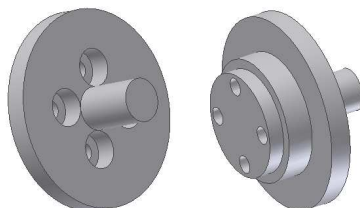
### Napájecí zdroj *PS35*

Celou sadu napájí stejnosměrný nestabilizovaný zdroj *PS35*. Tento zdroj o napětí 48 V je přímo určen k napájení programovatelné jednotky *CD30x*.

## 4.2 Mechanické ovládání manipulátorů

Ovládání otočného terče a stínítka řešíme pomocí krokových motorů, musíme ale navrhnout samotné uchycení těchto motorů k zařízení „Kaufman“.

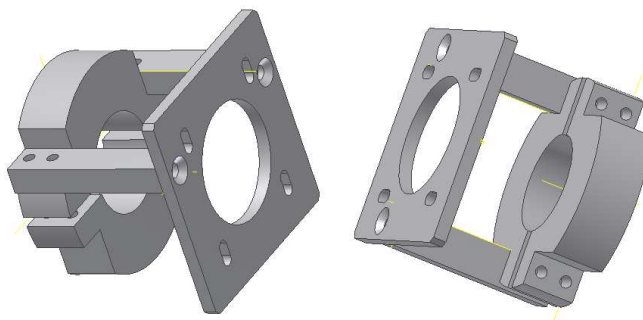
Nejprve bylo nutné nahradit stávající manuální manipulátory, manipulátory ovládatelnými pomocí krokových motorů. Rozhodli jsme se nekonstruovat kompletní manipulátory, ale upravit stávající manipulátory. U těchto manuálních manipulátorů je možné odšroubovat plastové hlavice, které lze nahradit duralovou násadou (Obr.4.2), upravenou pro připojení krokového motoru.



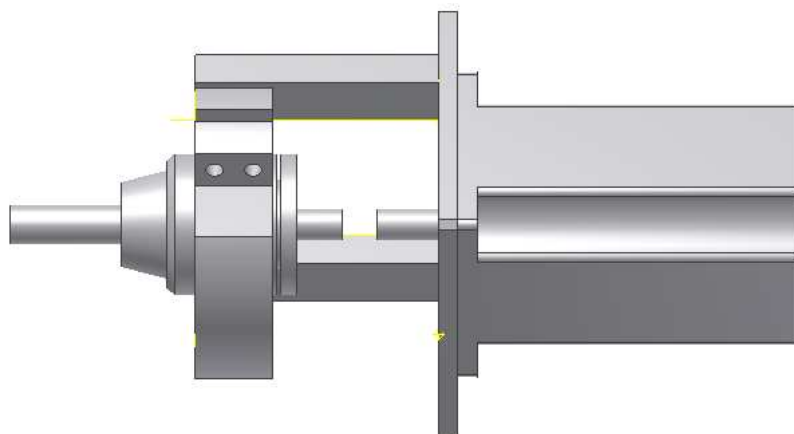
Obrázek 4.2: Duralová násada manipulátoru.

Druhým problémem byl návrh držáku rotační části krokového motoru. Bylo nutné zajistit souosost motoru a manipulátoru. Návrh tvoří objímka, tu lze upevnit přímo na manipulátor, a nosná konzole krokového motoru (Obr.4.3). Výrobním materiálem této konstrukce je opět dural. Konečné propojení manipulátoru s rotační částí krokového motoru je umožněno pomocí spojky, která byla k motoru dodána.

Jednoduchost konstrukčního návrhu odpovídá ekonomickým a hlavně výrobním požadavkům. Celková konstrukce je na obrázku 4.4.



Obrázek 4.3: Nosná konstrukce motoru.



Obrázek 4.4: Smontovaná konstrukce i s motorem (bez spojky mezi manipulátorem a rotační částí motoru).

### 4.3 Programování krokových motorů

Jak již bylo řečeno, programování těchto motorů, je uskutečněno pomocí jednoduchých *ASCII* příkazů odesílaných přímo na programovatelnou jednotku *CD30x*, pomocí sériového rozhraní *RS232*. Není tedy nutné se zabývat samotnou komunikací s ovládací deskou, ale pro ovládní stačí zadat sadu příkazů. Ta buď bude motorem interpretována přímo, nebo se příkaz uloží do paměti kontroleru jako podprogram. Tento podprogram můžeme ovládat uživatelskými vstupy, kdy kontroler vyhodnotí vstupní data a vykoná příslušný povel.

Příklad jednoduchého programu otočení motoru:

```
[
M1
C7
R
]
```

Kde M udává počet mikrokroků na jeden celokrok, C nastavuje zadaný výstup do hodnoty logická nula, R je příkaz jež vykoná pohyb se zadanými parametry.

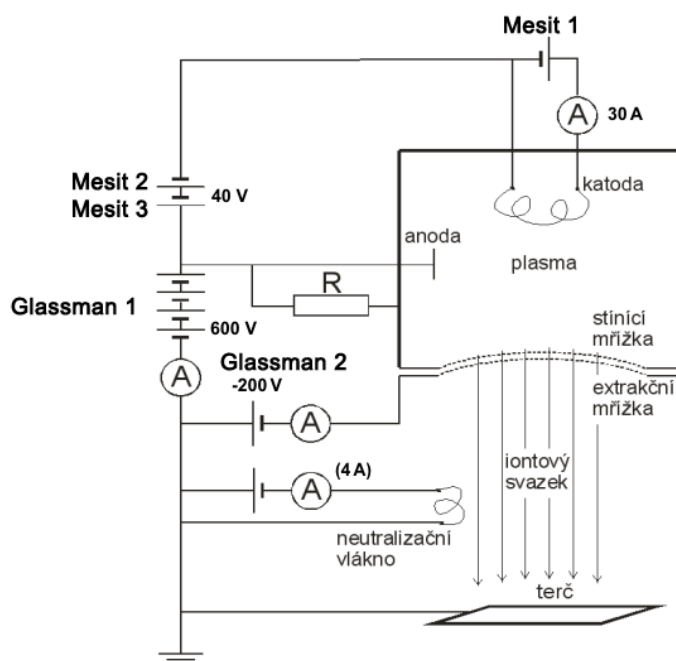
## 5 IONTOVÉ ZDROJE

### 5.1 Návrh ovládání primárního a sekundárního iontového zdroje

V kapitole o popisu aparatury „Kaufman“ byla uvedena zařízení, která se v něm fyzicky nalézají. Nyní uvedeme způsob jednotlivého napojení a ovládání těchto zařízení.

Iontový zdroj (ať už primární či sekundární) je ovládán pomocí sestavy proudových a napěťových zdrojů umístěných na napájecí „věži“. Tyto „věže“ máme dvě, jednu pro primární a druhou pro sekundární iontový zdroj. Každá z těchto „věží“ obsahuje vždy pět stabilizovaných napěťové/proudových zdrojů.

Schéma zapojení zdrojů a napájení jednotlivých částí iontového zdroje nalezneme na obrázku 5.1.



Obrázek 5.1: Schéma zapojení elektrického ovládání primárního iontového zdroje.

Dále je podrobně popsána funkce jednotlivých stabilizovaných zdrojů v aparatuře.

Nejnižší na napájecí „věži“ se vyskytuje stabilizovaný zdroj MESIT s výstupem na konektorech 0–40 V, v případě zapojení jako napěťového zdroje, případně 0–40 A pro zapojení jako proudového zdroje. V našem zapojení jde o MESIT označený jako



1 (primární zdroj), nebo 4 (sekundární zdroj). Tento zdroj je využíván hlavně jako proudový a nastavuje proud žhavicím vláknem iontového zdroje (katodou).

MESITY 2 a 3 (pro primární zdroje) případně 4 a 5 (pro sekundární zdroj) jsou používány čistě jako napěťové zdroje s výstupem na konektorech 0 – 40 V.

Všechny tyto zdroje se používají pro zapálení výboje na iontovém zdroji.

Nejvýše položené zdroje na napájecí „věži“ jsou zdroje firmy GLASSMAN. Jde o stabilizované vysokonapěťové zdroje s různými výstupními hodnotami.

GLASSMAN označený jako 1 (Glassman WX Series, pro primární zdroj), nebo 3 (Glassman ER Series, pro sekundární zdroj) mají za úlohu nastavit potenciál mezi zemí a extrakční mřížkou o jistou referenční hodnotu. Pro primární i sekundární zdroj jde o hodnotu –200 V.

Posledním zařízením v řídicí struktuře jsou GLASSMANy označené čísly 2 (Glassman EH Series, primární zdroj) a 4 (Glassman EH Series, sekundární zdroj). Ty mají za úkol zvýšit potenciál iontového zdroje, u primárního zdroje o 600 V a u sekundární je to hodnota v rozsahu 50 V až 400 V. Tím je určena energie extrahovaných iontů.

### 5.1.1 Postup zapálení výboje a extrakce iontů

Při řešení návrhu elektrického zapojení pro počítačové ovládání je nutné znát posloupnost úkonů pro zapálení výboje a následnou extrakci iontů. Tímto zjistíme, které hodnoty je třeba nastavovat a které naopak monitorovat.

V dalším popisu se budu zabývat pouze primárním iontovým zdrojem, tedy zdroji MESIT 1, 2, 3 (dále jen M1, M2 M3) a GLASSMAN 1, 2 (dále jen G1, G2). Sekundární iontový zdroj se ovládá naprosto analogicky pouze místo M1, M2, M3 se použijí Mesity M4, M5 a M6 a obdobně místo G1 a G2 se použijí G3 a G4. Přičemž v závorce v postupu jsou vždy uvedeny hodnoty které se u sekundárního zdroje liší.

Pro zapálení výboje v iontovém zdroji je typický následující postup (vycházíme z nulového nastavení na všech přístrojích):

1. Pustit přívod plynu a vyčkat než bude dosažen správný tlak.
2. Napětí mezi anodou a katodou se nastaví na 80 V. Tj. na M2 a M3 se nastaví napětí 40 V. Tato zařízení jsou v sérii a jejich výsledným součtem dostaneme 80 V. Ovládání proudu nastavíme u obou na maximální hodnotu a dále si jich už nevšímáme.
3. Ovládání napětí na M1 nastavíme na 40 V a dále se jím již nezabýváme. Proud na M1 zvyšujeme z hodnoty 0 A dokud nezačne procházet proud mezi katodou a anodou (zapálení výboje, registrován na M3) nebude roven 1, 5 A (0, 5 A pro sekundární zdroj)

4. Dále snižujeme napětí na M2 postupně k nule a korigujeme proud na M1 tak, aby proud mezi katodou a anodou (M3) byl stále na hodnotě 1,5 A (0,5 A)
5. Pokud je naměřený proud na M3 nastaven na 1,5 A (0,5 A) a zároveň napětí na M2 je nastaveno na 0 V, docílili jsme optimálních parametrů výboje iontového zdroje

Po zapálení výboje na vlákne iontového zdroje se dostáváme do fáze extrakce iontů. Té docílíme spuštěním zdrojů G1 a G2 a následujícím postupem. Výchozí hodnoty jsou opět nulové a odstup mezi žhavením vlákna a počátkem extrakce je minimálně 30 s.

1. Napětí, na stínící mřížce (G1) nastavíme na 600 V (50 V až 400 V pro sekundární zdroj, otočný knoflík nastavení proudu nastavíme na maximum a dále si jej nevšímáme)
2. Napětí na extrakční mřížce (G2) nastavíme na hodnotu  $-200$  V a otočný knoflík proudu nastavíme na maximum a dále si jej nevšímáme
3. Sledujeme proud procházející extrakční mřížkou (G1) tak aby byl stále na hodnotě 50 mA (30 mA pro sekundární zdroj) a pokud není této hodnoty dosaženo, vhodně upravujeme proud procházející vláknem iontového zdroje (M1)

Z uvedeného postupu zjišťujeme, že celá posloupnost úkonů je pro manuální ovládání dosti složitá a pro dosažení jisté přesnosti manuálně téměř nedosažitelná.

Dále je nutné kontrolovat spadnutí výboje (ten se projeví spadnutím proudu na M3 při žhavení na nulu a na G1 při extrakci na nulu) což celou operaci dále komplikuje.

Nyní je naprosto patrné, jaké hodnoty je nutné na napájecí „věži“ ovládat a jaké hodnoty číst. Výsledek znázorňuje další tabulka 5.1.

	čtení		zápis		
	U[V]	I[A]	U[V]	I[A]	
GLASSMAN 2	X	X	X		GLASSMAN4
GLASSMAN 1	X	X	X		GLASSMAN 3
MESIT 3		X			MESIT 6
MESIT 2			X		MESIT 5
MESIT 1	X			X	MEIST 4

Tabulka 5.1: Čtení a zápis na jednotlivých stabilizovaných zdrojích.

Tabulka obsahuje i některé nepotřebné údaje, které pro řízení iontových zdrojů nepotřebujeme. Tyto údaje mají pro nás ovšem jistou výpovědní hodnotu, proto je také monitorujeme.

### 5.1.2 Navržení elektrického obvodu pro ovládání a komunikaci s PC

Pro komunikaci a ovládání jednotlivých zdrojů s počítačem lze použít AD/DA převodníky, které přivádí, případně čtou napětí v rozmezí  $0 - 10\text{ V}$  na výstupu (vstupu). Toto napětí je poté ve stabilizovaných zdrojích vhodně přetransformováno na skutečné hodnoty napětí, nebo proudu. Blíže se o AD/DA převodnících zmíním později. Nejprve popíšeme ovládání jednotlivých stabilizovaných zdrojů. Ovládání těchto zdrojů rozdělíme na dvě kaskády. Kaskádu MESITů a kaskádu GLASSMANů, jež se každá ovládá trochu jinak.

#### Kaskáda MESITů

Každý z iontových zdrojů používá k ovládání 2 zdroje MESIT s výstupy  $0 - 40\text{ V}$  (současně  $0 - 10\text{ A}$ ) a jeden zdroj s výstupem  $0 - 40\text{ V}$  (současně  $0 - 40\text{ A}$ ). Elektrické schéma zapojení (Obr. 5.2) je u všech tří stejné, liší se pouze velikostí proudu na výstupu.

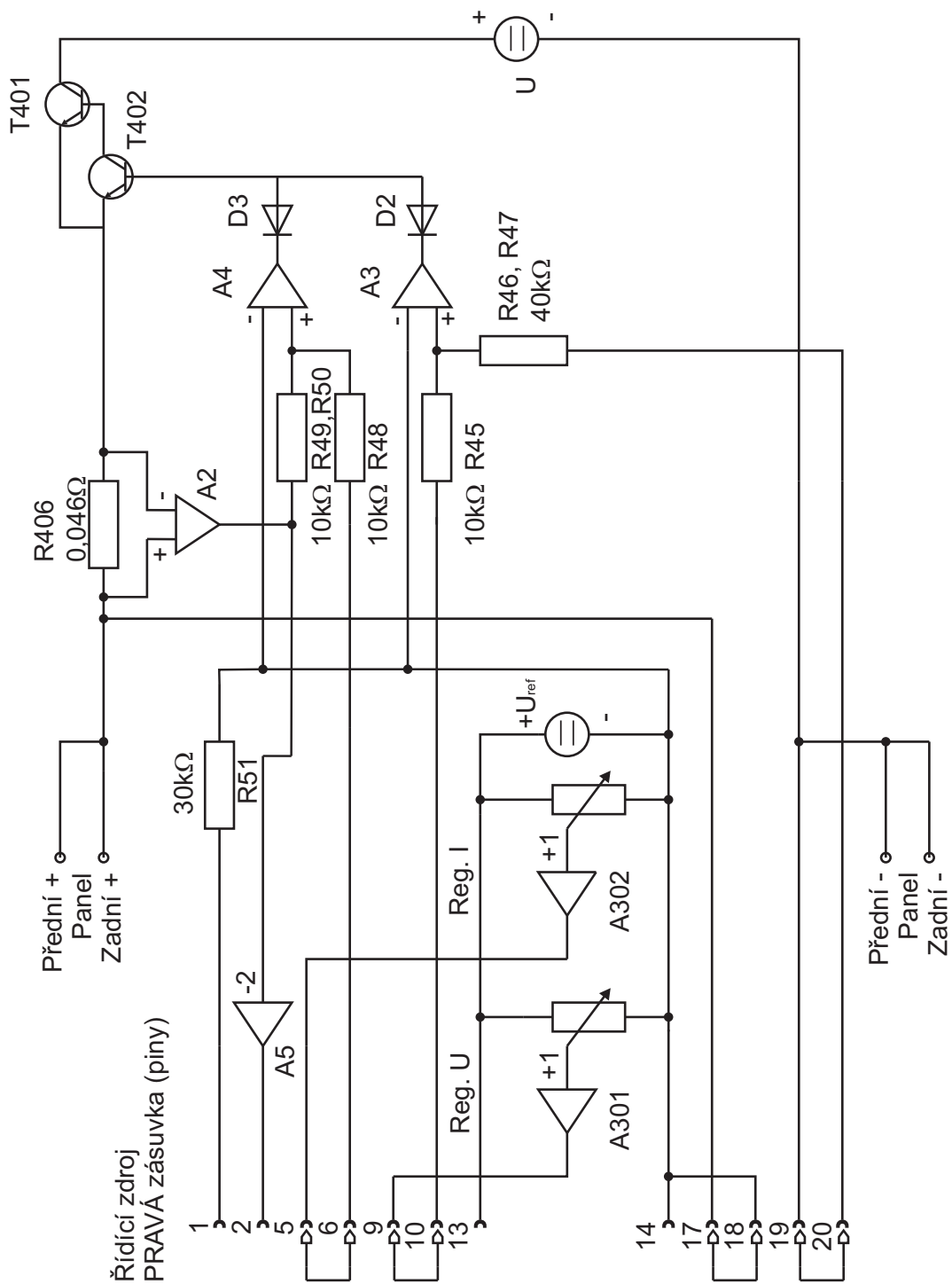
Pohledem na schéma zjistíme, že velikost proudu na zařízení se čte mezi piny 2 a 18. Dále zjistíme, že výstup na měření napětí zde není zaveden a je tedy nutné číst napětí přímo na výstupu zdroje tj. mezi piny 18 a 20.

Manuální nastavení napětí je dáno změnou referenčního napětí  $U_{REF}$  pomocí potenciometru mezi piny 9 a 18. Obdobně se nastavuje proud, ovšem mezi piny 5 a 18.

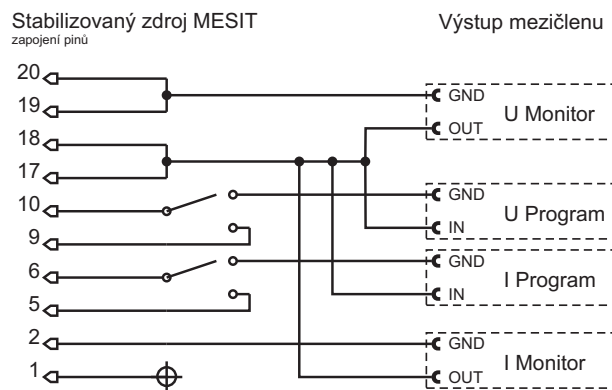
Pro počítačové řízení jsme nuceni vyřadit tyto okruhy s potenciometry (rozpojit piny 5-6 a 9-10) a zavést z AD/DA převodníku napětí ( $0 - 10\text{ V}$ ) přímo mezi piny 6, 18 (pro  $I$  regulaci) a 10, 18 (pro  $U$  regulaci).

Tuto strukturu vyřešíme mezičlenem (Obr. 5.3) s kabelovými vývody na kterém lze nastavit pomocí vypínače manuální nebo počítačové řízení. Návrh tohoto mezičlenu je řešen zcela univerzálně, kdy každý z nich můžeme použít jak pro nastavení proudu tak pro nastavení napětí stejně jako čtení obou hodnot.

Ačkoli se zdá, že již nic nebrání k vzájemnému propojení stabilizovaných zdrojů s AD/DA převodníkem, opak je pravdou. Bohužel ze schématu vnitřního zapojení MESITU je patrné, že nejsou jednotlivé vstupy a výstupy galvanicky odděleny. Stejně tak nejsou galvanicky odděleny vstupy a výstupy na AD/DA převodníku BASPELIN SVZ kterým mají být tyto zdroje ovládány. Při zapojení dojde tedy k



Obrázek 5.2: Schéma zapojení stabilizovaného zdroje MESIT s piny pro manuální ovládání.



Obrázek 5.3: Mezičlen stabilizovaného zdroje MESIT.

chybě. Navíc země jednotlivých MESITů nejsou stejné M2 má zemní napětí oproti M3 zvýšené o hodnotu 40 V a M1 dokonce o hodnotu součtu M3 a M2 tedy až o 80 V.

Tento problém vyřešíme přidáním galvanických oddělovačů mezi stabilizované zdroje a AD/DA převodníky. Díky galvanickým oddělovačům budou jednotlivé vstupy a výstupy galvanicky odděleny a při řízení a čtení budou jednotlivé země na stejném potenciálu.

## Galvanické převodníky SMARIS

Volba galvanických oddělovačů firmy SMARIS je podložena jednak nízkou finanční náročností a jednak škálou parametrů jež tyto převodníky nabízejí. Jak již bylo řečeno, funkcí galvanického oddělovače je galvanické oddělení jednotlivých kanálů. Rozdíl vstupních a výstupních napětí, může u těchto zařízení být až 1,5 kV což pro naše účely více než stačí.

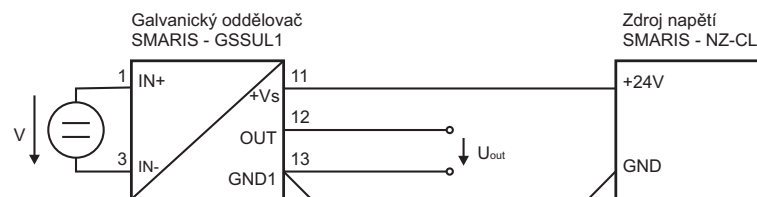
Nutné čtené a zapisované hodnoty jednotlivých MESITUů zobrazuje tabulka 5.1. Zakoupeny byly tedy 4 galvanické oddělovače vždy pro jednu větev ovládání iontového zdroje. Jmenovitě tedy

- 3×GSSUL1 se vstupem 0 – 10V a výstupem 0 – 10V
- 1×GSSUL1 se vstupem 0 – 40V a výstupem 0 – 10V (kvůli přímému měření napětí na M1)

Každý z těchto galvanických oddělovačů napájíme zvlášť 24V zdrojem firmy SMARIS typu *NZ – CL* (Obr. 5.4).

## AD/DA převodníky BASPELIN SVZ

BASPELIN SVZ obsahuje konvertor se sériovým výstupem RS232 a základní jednotku se svorkovnicí. Konvertor je propojen s počítačem pomocí sériového rozhraní



Obrázek 5.4: Zapojení napájení galvanických oddělovačů.

RS232 a k základní svorkovnici se propojí pomocí dvou optických kabelů. Do konvertoru můžeme paralelně zapojit až 3 základní svorkovnice, ovšem pro náš účel budou nutné pouze dva. Jednu na ovládání MESITů primárního a druhou na ovládání MESITů sekundárního iontového zdroje.

Napájení konvertoru i základní jednotky uskutečníme přímým připojením k síti s napětím 230 V. Napájecí napětí konvertoru musí být přibližně na stejném potenciálu jako napájecí napětí počítače. Kvůli oddělení konvertoru od svorkovnice pomocí dvou optických kabelů nehraje rozdíl potenciálů těchto dvou zařízení žádnou roli.

Svorkovnici tvoří vždy 24 vstupů s příslušnými svorkami nulového potenciálu a 24 výstupů s příslušnými svorkami nulového potenciálu.

Pro komunikaci počítače s konvertorem je nutné nastavit komunikaci přes sériové rozhraní na následující hodnoty: přenosová rychlost 9600 Bd, 8 datových bitů, 1 stop bit, bez parity.

Základní jednotka trvale vysílá data odpovídající měřeným výstupním napětím. Přenos se uskutečňuje textovým řetězcem konstantní délky 8 znaků, kdy poslední dva znaky jsou řídicí tedy \r a \n. Zbylých 6 znaků lze interpretovat takto, první dva znaky znamenají vstup převodníku zbylé 4 znaky jmenovitou hodnotu napětí na vstupu.

Přepoččet čtyřmístného kódu na jmenovité napětí je následující, hodnota 4000 je rovna 10 V jednoduchým přepočtem zjistíme, že hodnota 0001 je rovna 0,0025 V.

Při paralelním zapojení více svorkovnic do jednoho konvertoru je nutné pro čtení ještě měnit hodnoty *RTS* a *DTR* podle toho v jakém vstupu jsou svorkovnice na konvertoru zapojeny. V závislosti na těchto hodnotách budou posunuty i příslušné čtené hodnoty (viz Tab. 5.2).

<i>RTS</i>	<i>DTR</i>	čtené výstupy
0	0	00xxxx-23xxxx
1	0	24xxxx-47xxxx
0	1	48xxxx-71xxxx

Tabulka 5.2: Nastavení *RTS* a *DTR* a příslušné čtené výstupy.

Zápis se uskutečňuje pomocí 8 znaků kdy poslední dva znaky jsou řídicí znaky tedy \r a \n. Provádí se obdobně jako čtení ovšem není ovlivněn nastavenou hodnotou *RTS* a *DTR*. Stačí tedy na výstup odeslat 6 znaků v rozmezí 00xxx-71xxx které nastaví příslušné vstupní hodnoty a zakončit je dvěma řídicími znaky.

### Schéma zapojení

Celkové schéma zapojení kaskády MESITů, mezičlenů a galvanických oddělovačů s AD/DA převodníkem BASPELIN SVZ je na obrázku 5.5.

### Kaskáda GLASSMANů

Zapojení kaskády GLASSMANů je značně jednodušší. Schéma zapojení zdrojů při napájení iontového zdroje naznačuje, že oba GLASSMANy jsou na stejném potenciálu. Tyto zdroje jsou také značně modernější nežli předchozí MESITY a jejich výstupy jsou již zcela galvanicky oddělené. GLASSMANy jsou také zcela připravené pro ovládání z externího zařízení. Na zadní straně se již vyskytují konektory s výstupem 0 – 10 V pro přímé ovládání.

Ovládání GLASSMANů řešíme pomocí AD/DA převodníku firmy National Instruments (NI USB 6229), lze jej k počítači připojit přímo pomocí rozhraní USB. Největší devizou tohoto převodníku shledávám jeho ovládání. Vyrobila jej totiž firma která je zodpovědná za programovací prostředí LabVIEW, ve kterém se nachází komponenta umožňuje pohodlné ovládání tohoto převodníku.

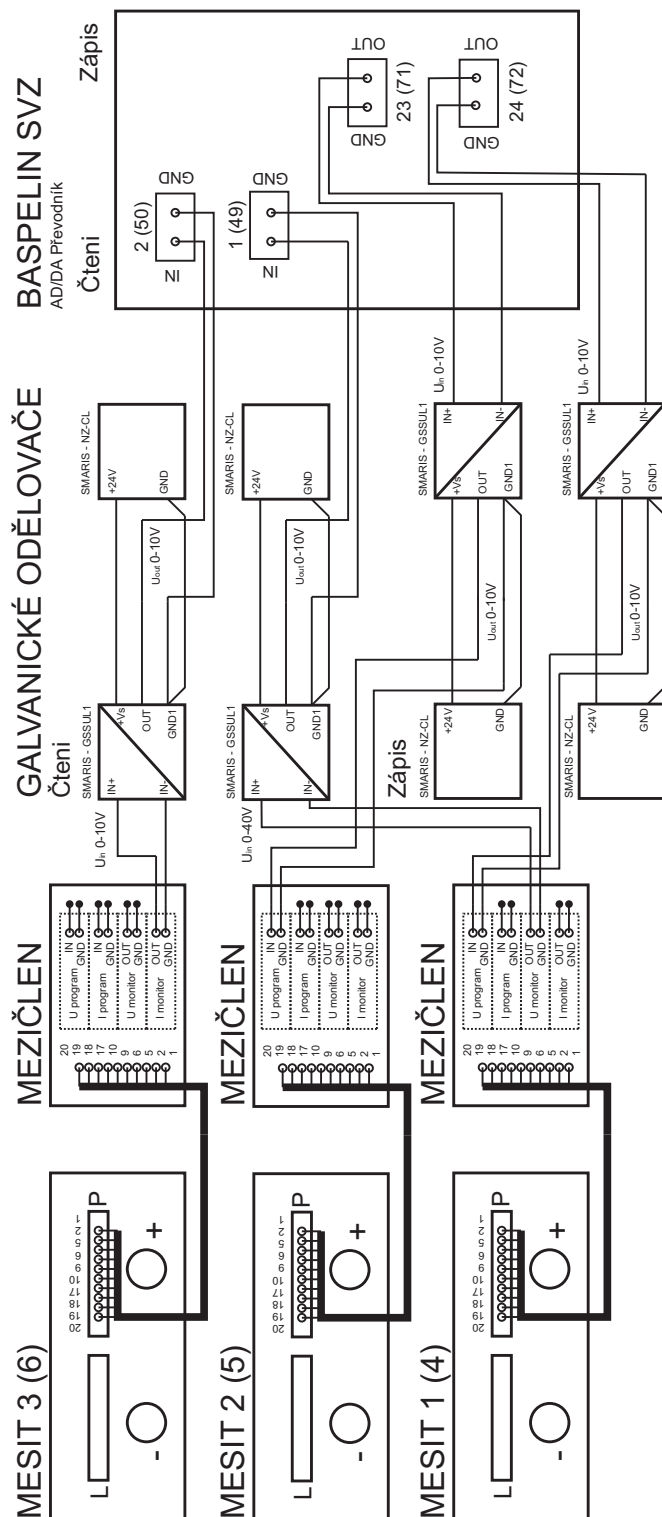
Stejně jako minule i zde je zapojen mezičlen (Obr. 5.6), kterým lze přepínat mezi manuálním a počítačovým řízením.

### Schéma zapojení

Celkové schéma zapojení kaskády GLASSMANů a AD/DA převodníkem a mezičlenem se nachází na obrázku 5.7.

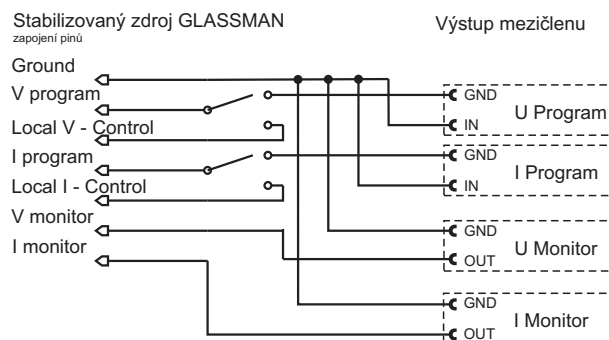
## 5.2 Programování v LabVIEW

LabVIEW [2] je grafické vývojové prostředí ve kterém se vyvíjí měřicí, řídicí a automatizační systémy. Při tvorbě aplikace na této platformě není nutné přímo psát řádky textu, nýbrž využívá se ikon které zastupují vždy jisté komponenty, jejichž úkoly jsou přesně naprogramovány. Uživatel se tedy nezabývá samotným programováním jednotlivých funkcí, ale využívá již dané komponenty které jsou k tomu účelu primárně určené. Samotná interpretace jazyka je založena na principu datového toku, kde tok



Obrázek 5.5: Celkové zapojení kaskády MESITů.





Obrázek 5.6: Mezičlen stabilizovaného zdroje GLASSMAN.

dat procházející uzly diagramu určuje posloupnost provádění funkcí což je oproti konvenčním programovacím jazykům převratná myšlenka.

LabView jakožto programovací platformu zvyhodňuje i její primární účel integrace s nejrůznějšími měřicími zařízeními. V současné době dochází k nárůstu ovládacích knihoven a stejně tak se rozrůstá komunita uživatelů tohoto systému kteří ocení přímou a vizuální prezentaci svých myšlenek.

Navržení a realizace aplikace v LabView se tak stává jednodušší záležitostí, kdy i laik je schopen rozpoznat co který blok programu vykonává. Srozumitelnost a jednoduchost byla jedním z hlavních důvodů proč jsme zvolili tento programovací jazyk jako základ při automatizaci celého systému.

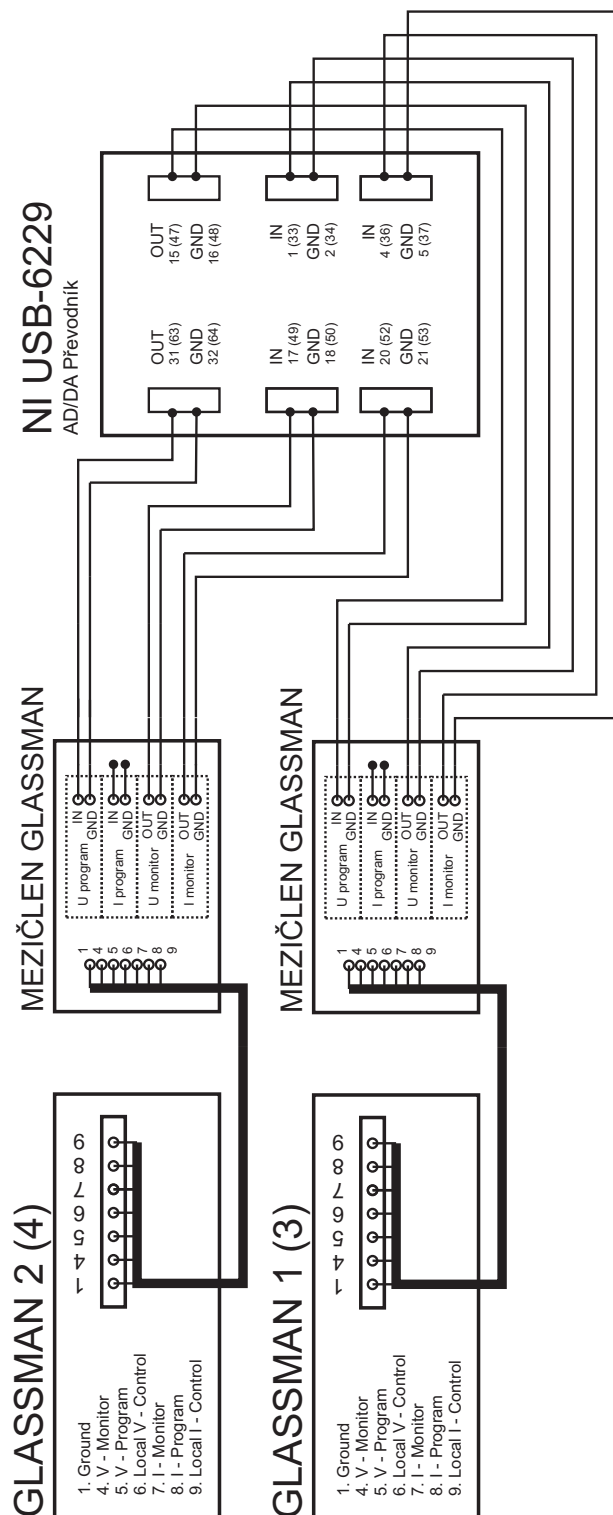
### 5.2.1 Program Kaufman 1.0

Na obrázku vidíme grafické rozhraní programu Kaufman 1.0. Tento program se zabývá ovládáním celé napájecí „věže“ a to jak primárního tak sekundárního iontového svazku, nebo obou zdrojů najednou.

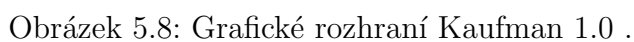
Z grafického výstupu je na první pohled zřetelné jasné rozdělení na tři bloky. Dva boční bloky znázorňují reálnou strukturu první i druhé napájecí „věže“. Tyto bloky jsou přesně označeny a funkce jednotlivých zařízení byla popsána v předcházejících kapitolách. Na zařízení se vyskytují 2 typy indikátorů. První typ s červeným ukazatelem je voltmetr/ampérmetr uživatelem nastavovaných hodnot. Při manuálním módu mají nulovou výpovědní hodnotu, ovšem při módu automatickém nám říkají, co daný systém vlastně provádí.

Druhou část vyplňují ukazatele modré, což jsou počítačově měřené hodnoty. Celé toto schéma by mělo odpovídat tabulce nastavovaných a měřených dat, která byla popsána v kapitole o postupu zapálení výboje a extrakci iontů.

Střed diagramu je tvořen záložkovou strukturou se dvěmi záložkami nazvanými manuální a automatické ovládání. Manuální mód není nic jiného než obyčejné ovládání nastavení proudu či napětí kterého by bylo možno dosáhnout i bez použití počítače.



Obrázek 5.7: Celkové zapojení kaskády GLASSMANů.



Mód automatického ovládání je oproti tomu již naprogramován jako sled úkonů které musíme podstoupit při žhavení vlákna a následné extrakci iontů na mřížce. Podrobnější popis této procedury je popsán v předcházejících kapitolách. Při tomto módu lze individuálně nastavit proud mezi katodou a anodou, ke kterému bude systém v prvotních fázích konvergovat při žhavení vlákna iontového zdroje.

Dále lze nastavit napětí na extrakční mřížce a napětí zvedající zemní potenciál žhaveného vlákna. Posledním parametrem pro dosažení depozice je proud na extrakční mřížce kolem kterého by měla výsledná hodnota po zbytek experimentu oscilovat s dostatečnou přesností.

Celý program má ještě v hlavičce skupinu tlačítek, jejichž aktivací spustíme měření i zápis hodnot z celého systému. Bez jejich aktivace nebude fungovat ani manuální ani automatický mód ovládání.

### 5.2.2 Blokové schéma programu Kaufman 1.0

Blokové schéma našeho programu není úplně jednoduché a bylo nutné jej rozdělit do několika dílčích podprogramů. Těmito podprogramy jsou:

- komunikace s AD/DA převodníkem BASPELIN SVZ,
- formátování dat a zápis hodnot na AD/DA převodník BASPELIN SVZ,
- formátování a vyhodnocení dat z AD/DA převodníku BASPELIN SVZ,
- komunikace, zápis a čtení dat z převodníku firmy National Instruments.

Kromě těchto podprogramů je zde ještě hlavní program ve kterém je naprogramována celá struktura automatického módu. Podrobnější popis jednotlivých bloků se nachází níže.

#### Komunikace s AD/DA převodníkem BASPELIN SVZ

Primární účel tohoto podprogramu (Obr. 5.9) je navázání kontaktu s převodníkem, přičemž se nezabývá strukturou dat převodníkem přijatých, nebo do převodníku odeslaných. Tato data přeposílá dál do zbytku programu, kde jsou dále zpracovávána.

Na programovém schématu nalézáme tři části. Blok úplně nalevo odesílá textový řetězec libovolné délky na převodník. Další dva bloky se zabývají čtením dat z převodníku. Kvůli rozdílnému nastavení *RTS* a *DTR* je nezbytné aby tyto bloky byly dva. Každý z těchto bloků se také snaží o získání textového řetězce délky 215 znaků tj. jednoho kompletního cyklu dat (24 výstupů s 8 znaky na výstup je rovno 192 znaků) přičemž neúplné počáteční a koncové řetězce jsou filtrovány. Zpoždění mezi jednotlivými čtecími cykly je nastaveno na 30 ms. Toto zpoždění je nutné kvůli delší době změny vstupních kanálů nastavením *RTS* a *DTR*.



## **Formátování dat a zápis hodnot na AD/DA převodník BASPELIN SVZ**

Tento podprogram (Obr. 5.10) se zabývá správnou interpretací nastavovaných dat, které přepočítává na čtyřmístný kód, ten je rozdělen na jednotlivé znaky a odeslán do komunikačního protokolu, ze kterého je dále odeslán na převodník.

Pro přepočet nastavených dat je vymyšlen algoritmus pomocí dělení. Chceme-li tedy na zařízení jehož rozsah je 0 – 40 V nastavit hodnotu 40 V pomocí AD/DA převodníku s jmenovitým výstupním napětím do 10 V (čemuž odpovídá kód 4000) je nutné vydělit reálnou nastavenou hodnotu přesností o velikosti 0,01 tak získáme  $40/0,01 = 4000$ . Výsledek je tedy interpretován tak, že na výstupu AD/DA převodníku se nastaví jmenovité napětí 10 V což si zdroj napětí přeloží jako příkaz pro nastavení 40 V.

Na schématu jsou na první pohled patrné 4 bloky, ve kterých se vyhodnocují nastavovaná data pro jednotlivá zařízení. Výsledný textový řetězec je spojen do jednoho kusu a celý odeslán.

## **Formátování a vyhodnocení dat z AD/DA převodníku BASPELIN SVZ**

Tento podprogram (Obr. 5.11) je obdobou podprogramu určeného pro zápis. Rozdílem ovšem je, že převádí získaný čtyřmístný kód na reálnou nastavenou hodnotu. Hodnoty jsou v textovém řetězci hledány tak, že program vyhledává první 4 znaky z osmimístného kódu například `\r\n49` a další 4 znaky interpretuje takto hodnotu nastaveného napětí.

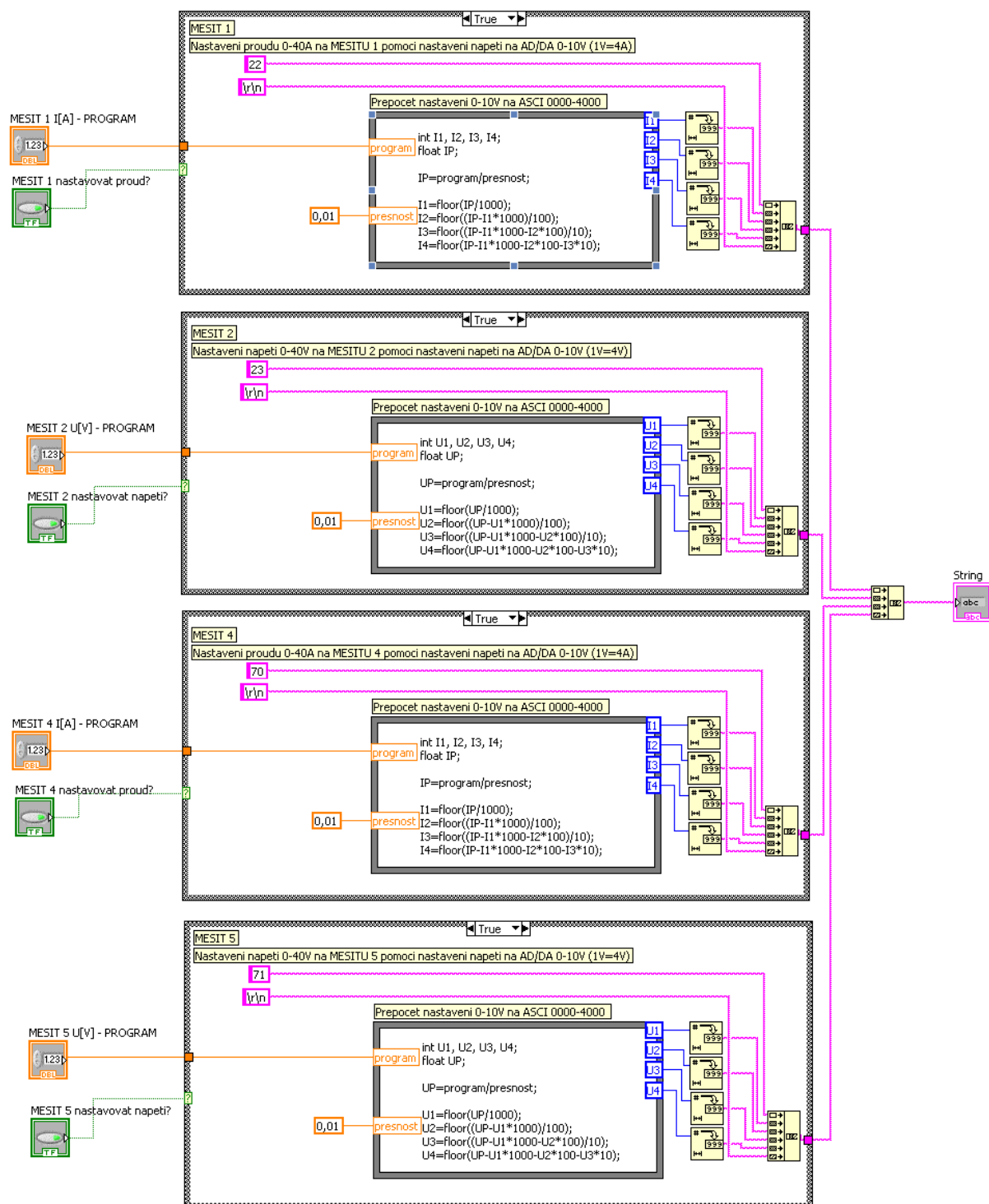
## **Komunikace, zápis a čtení dat z převodníku firmy National Instruments**

Jak již bylo řečeno, ovládání převodníku firmy National Instruments (NI USB 6229) je mnohem jednodušší. Proto tento podprogram obsahuje jak komunikační tak interpretační cyklus. Celá komunikace s zařízením funguje pomocí komponenty DAQ Assistant ve které můžeme nastavit všechny vstupní a výstupní parametry. V našem případě jde o vstupy i výstupy v rozsahu 0 – 10 V, které dále přepočítáváme na reálnou nastavenou hodnotu.

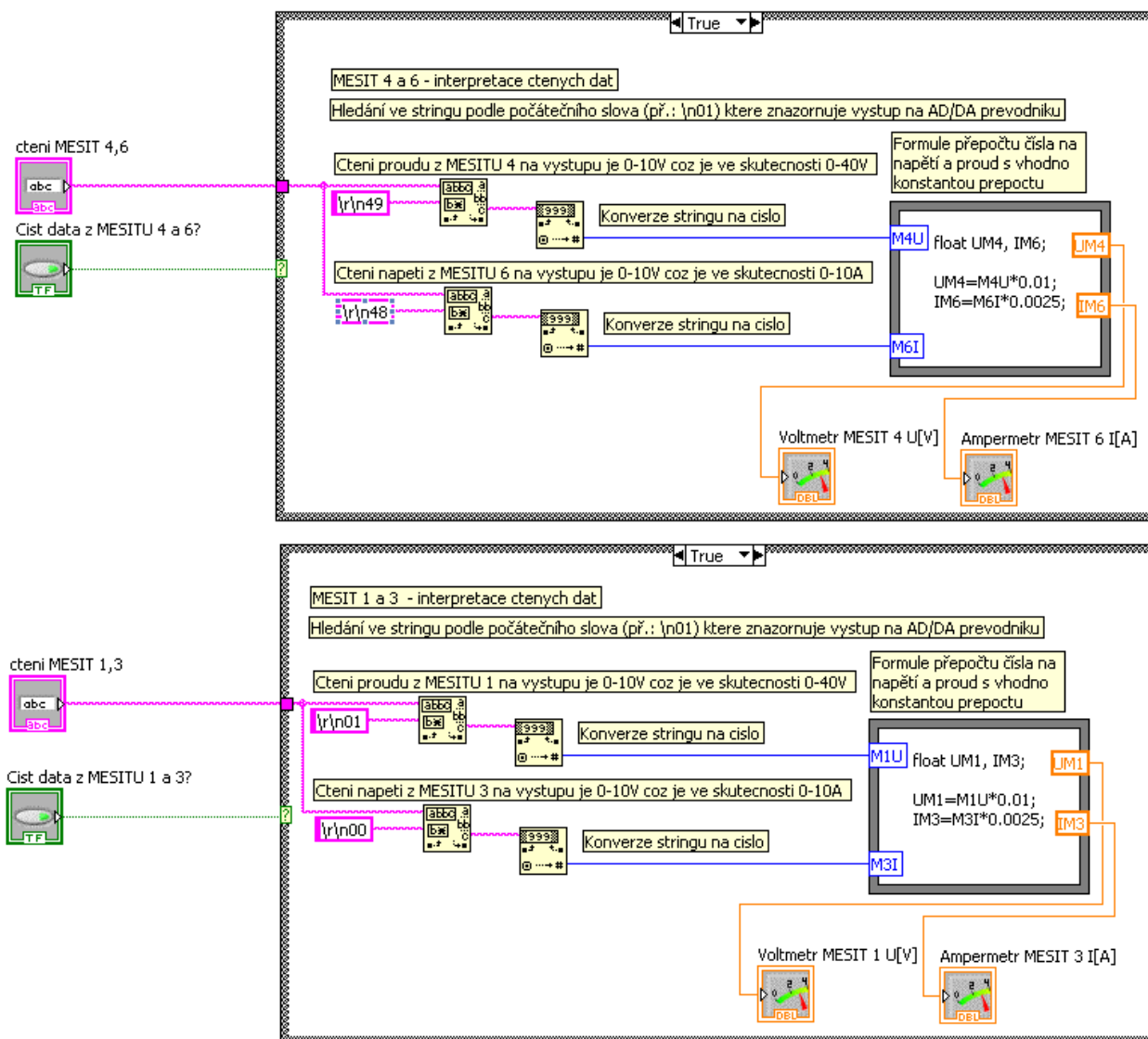
## **Hlavní program**

V okně hlavního programu se vyskytují jednak komponenty nahrazující podprogramy do kterých jsou přiváděny příslušné konektory a také 2 bloky programu zabývající se automatickým ovládáním celé sestavy (jeden blok pro každý z iontových zdrojů).

Pro naprogramování vlastností automatiky jsem se rozhodl využít čistého programovacího kódu. Tento kód je zjednodušenou variací jazyka C++ a dané cykly by

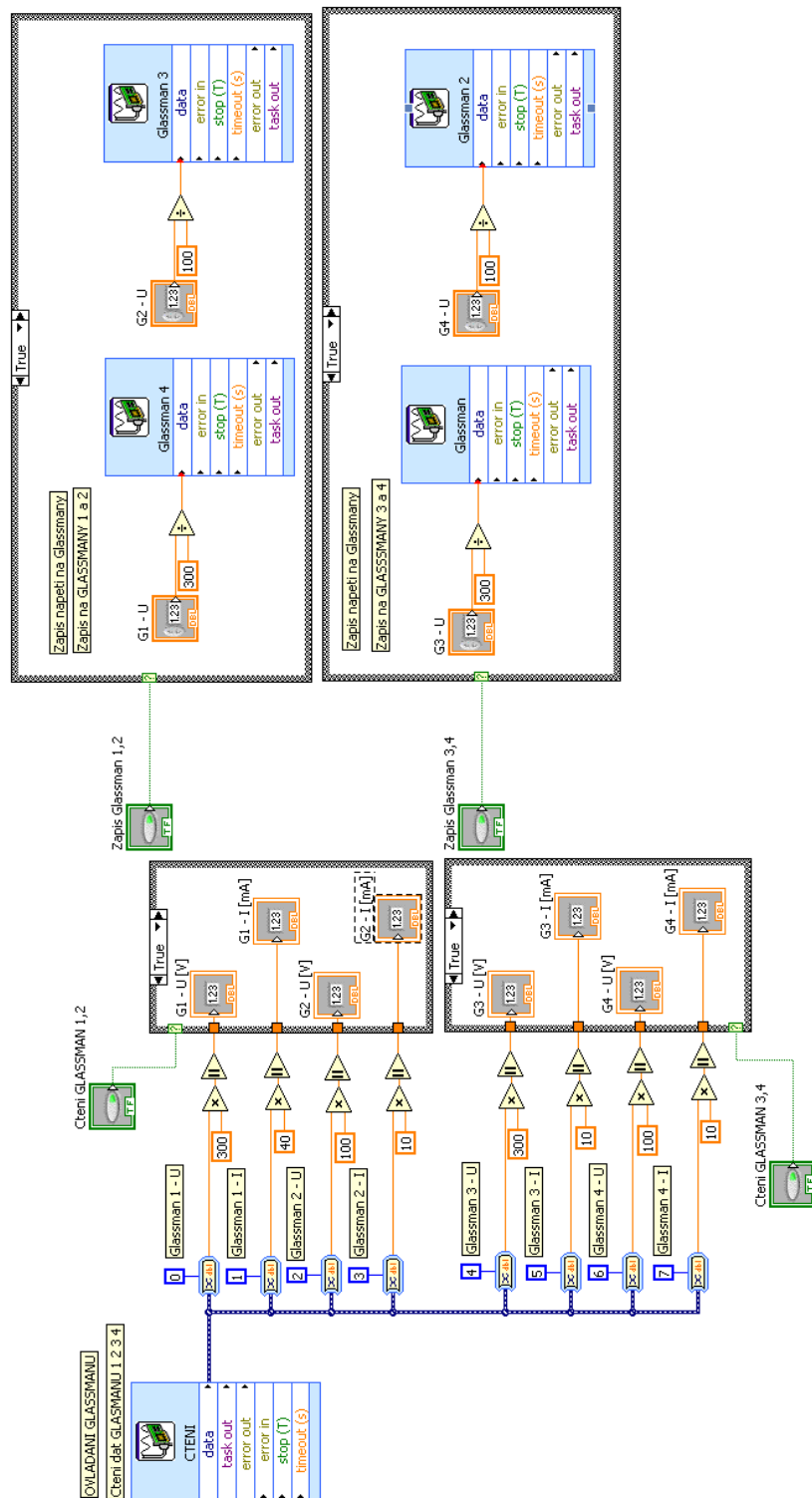


Obrázek 5.10: Formátování a zápis dat BASPELIN SVZ.



Obrázek 5.11: Formátování a čtení dat BASPELIN SVZ.





Obrázek 5.12: Ovládání NI USB 6229.

bylo velice obtížné popsat nějak jinak. Pro vysokou náročnost popisu celého bloku se nebudu zabývat jednotlivými částmi programového kódu. Samotný kód je vnitřně komentován a struktura navržena tak aby odpovídala postupu zapálení výboje a extrakce iontů o kterých byla řeč v předchozích kapitolách.

## 6 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Provedení série testovacích experimentů je posledním bodem této bakalářské práce.

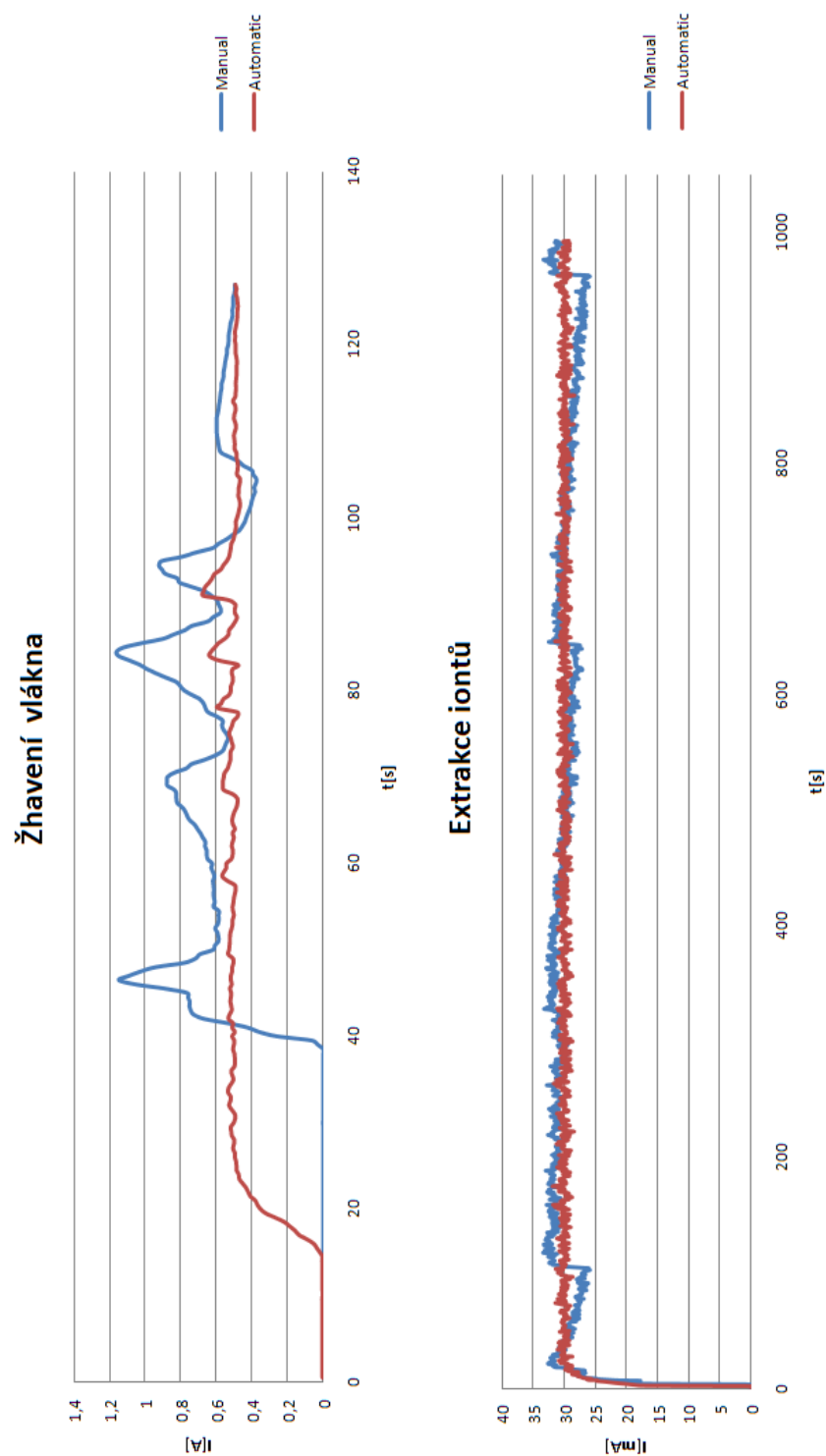
Pro objektivní zhodnocení výsledků byly provedeny série experimentů zažehnutí a extrakce iontů na iontovém zdroji nejdříve manuálně a později i automaticky (Obr. 6.1).

První graf znázorňuje nastavení žhavicího proudu mezi katodou a anodou v závislosti na čase. Z tohoto grafu je na první pohled zřejmé, že automatické ovládání je přesnější. Zřetelné výkyvy v automatickém ovládání v čase 60–100 s jsou způsobeny skokovým poklesem napětí (o 5 V) na Mesitu 2 v procesu žhavení. Toto zkreslení se dá odstranit jinou volbou počátečních parametrů (např. zmenšení poklesu napětí na Mesitu 2 o 2 V místo současných 5 V). V čase 100–125 s jsou u automatického ovládání zřetelné už pouze malé výkyvy od námi požadované hodnoty 0,5 V.

Druhý graf zobrazuje závislost průchodu konstantního proudu extrakční mřížkou v závislosti na čase. Z tohoto grafu je již naprosto zřetelné, že automatické ovládání je mnohem přesnější a to již od samého počátku. Zatímco při manuálním ovládání je nutné hodnotu stále korigovat, automatické ovládání tyto výkyvy odstraňuje průběžně.

Přesto, že automatické ovládání naprosto předčí manuální, můžeme mít výhrady k její přesnosti. U digitálního zpracování by se dala očekávat mnohem větší přesnost, opak je ale pravdou. Například MESIT s označením 3, na kterém při žhavení požadujeme nastavení hodnoty na 1,5 A. Rozsah ampérmetru na MESITu je 0–10 A které se transformují na výstupu do hodnoty 0–10 V. Toto napětí je předáno AD/DA převodníku BASPELIN SVZ a programově převedeno do indikátoru na příslušnou hodnotu. BASPELIN SVZ ovšem hodnotu 10 V převede na číslo 4000 to znamená, že nejnižší možná soustava znaků tedy 0001 bude mít jmenovitou hodnotu 0,0025 V (v přepočtu 0,0025 A). Tato přesnost je poměrně vysoká avšak čtení a následné vzorkování převodníku je zanesen jistou chybou a poslední čtený znak tak ztrácí na výpovědní hodnotě. Dalšího zkreslení signálu jsme dosáhli přidáním galvanických oddělovačů, kdy každý z těchto oddělovačů si reálně nese chybu 0,5% na přenosu. Největší problém nastává v případě kdy korigujeme hodnotu na M3 hodnotou na M1. MESIT 1 má totiž rozsah proudů 0–40 A to při převodu do převodníku znamená pro nejnižší znak, tedy 0001 pouze přesnost v řádech 0,01, zápis je ovšem poměrně více stabilní nežli čtení. Chyby čtení a přenosu přes galvanické oddělovače jsou patrné i zde. Výsledkem je, že pokud chceme nastavit hodnotu žhavicího napětí na 1,5 A dokážeme nastavit hodnotu pouze někde v rozmezí 1,48–1,52 A nikoli však přesnou referenční hodnotu.

U zdrojů typu GLASSMAN je situace obdobná. V systému nejsou sice galvanické oddělovače a AD/DA převodník je také schopen číst hodnoty na větší počet



Obrázek 6.1: Grafy zažehnutí a extrakce iontů.

digitálních míst, ovšem rozsah napětí je u nejsilnějšího zdroje 0–3000 V při přepočtu 0 – 10 V na výstupu docílíme toho, že změnou napětí z nuly na hodnoty 0,01 dojde ke skoku napětí na reálném zdroji o 3 V. U měření proudu je situace lepší, protože největší rozsah činí pouze 0 – 400 mA což i při přepočtu dává dostatečně přesné hodnoty.

I přes tyto nedostatky je přesnost oproti manuálnímu ovládání značně lepší a další výhodu automatického ovládání lze nalézt i v časové úspoře, kdy není nutné během celého procesu nastavení aparatury neustále manuálně opravovat a korigovat. Výhodou je také jednoduchá opakovatelnost celého procesu.

## 7 ZÁVĚR

Tato práce se zabývá funkcí a problematikou automatického ovládání iontových zdrojů Kaufmanova typu.

První část je zaměřena na teoretické poznatky z oblasti leptání a napařování tenkých vrstev metodou IBAD. Popisuje fyzikální podstatu této metody, interakci iontů s povrchem a způsoby využití. Pochopení funkce iontových zdrojů je nezbytné pro řešení problému řízení depozičního procesu pomocí počítače.

Druhá část se zabývá jednotlivými praktickými úkoly bakalářské práce. V úvodu je popsána depoziční aparatura „Kaufman“ na které jsou prováděny všechny nezbytné automatizační úpravy. Dále jsou popsány konstrukční úpravy manipulátorů, jejich ovládání a částečně i způsob programování. Obdobně je řešena část zabývající se ovládáním iontových zdrojů. Je zde nastíněn způsob zapojení iontových zdrojů a jejich ovládání pomocí stabilizovaných zdrojů Mesit a Glassman. Názorně je popsáno zapojení ovládání pro řízení počítačem a na závěr popis ovládacího programu.

Kapitola popisující test aparatury a zhodnocení výsledků pojednává o rozdílech mezi manuálním a automatickým ovládáním. Naznačuje jeho výhody a upozorňuje na problémy, které by bylo možné zlepšit.

## LITERATURA

- [1] KAUFMAN, H. R., CUOMO, J. J. and HARPER, J. M. E.: *Technology and applications of broad-beam ion source used in sputtering*. J. Vac. Sci. Technol. 21 3, **1982**, 725-735.
- [2] TRAVIS, J. and KRING, J.: *LabVIEW for Everyone: Graphical Programming Made Easy & Fun*. Prentice Hall PTR, **2006**
- [3] MÖHLER, W.: *Fundamentals of Ion-Surface Interaction*. Technische Universität Dresden, **2004**
- [4] VLADIMÍR, M.: *Metody přípravy povrchů pro fyzikální elektroniku*. MFF UK v Praze, **2007**